

論文の内容の要旨

論文題目	振幅変調された光格子中の冷却原子のダイナミクス
学位 申請者	山越智健

レーザー冷却技術の発達により中性原子気体を極低温領域($\sim 10^{-9}\text{K}$)まで冷却することが可能となった。原子がボーズ・アインシュタイン統計に従う場合、この温度領域では巨視的な量子オブジェクトであるボーズ・アインシュタイン凝縮体(BEC)が現れる。1995年に原子気体BECの実験的生成が成功して以来、極低温原子に関する様々な研究が実験と理論の双方から行われてきた。中でも光格子と呼ばれるレーザー光によって作られる周期ポテンシャル中の冷却原子気体の振舞いと量子操作が、近年特に興味を持たれている。

光格子中の冷却原子系で興味深い研究対象の一つは、特定の格子サイトに局在した固有状態の出現である。このような空間的局在状態は、調和トラップ等の冷却原子集団全体を閉じ込める外部トラップと光格子の複合ポテンシャル中で現れる。この状態に関する研究は2004年にフェルミ原子系で観測実験が行われ、局在状態の操作を用いた応用について示唆された[1]。2012年および2013年にAarhus大学のArltらのグループによって行われたボーズ原子系の実験で、大きな進展が遂げられた[2]。

この実験では、まず光格子によるポテンシャルエネルギーの大きさを変調すること(光格子振幅変調)によって励起波束を生成する。そして励起波束が十分伝搬した後、局在固有関数に脱励起させることによって、コヒーレントな局在波束を生成する[2]。また光格子振幅変調の過程や励起波束の運動はコヒーレント操作の重要なツールであることに加えて、再帰現象に関連しているため、そのダイナミクス自体が興味深い研究対象である。しかしながら、光格子振幅変調による励起過程、生成された励起波束のダイナミクスの理論的解析は十分行われてこなかった。そこで本研究では光格子中のボーズ粒子を対象とし、それらのプロセスがどのように記述されるかを調べるために理論研究を行った。

実験によると励起された波束はBECと強く相互作用しないことが報告されているので、本論文では1次元で、原子間相互作用がない系(理想ボーズ気体)を扱う。初期状態の温度は絶対零度であることを仮定している。

本論文の内容は以下の通りである。

第1章は本研究の背景となる実験および理論の概要である。

第2章ではBECについての簡単なレビューと、その研究の歴史的背景について説明する。

第3章では周期ポテンシャル系における基礎的な事項と本論文で用いる数学的表記について説明する。この章では主に周期ポテンシャル系の特徴であるバンド構造(バンド指数、擬運動量によって指定されるブロッホ状態)、周期ポテンシャルに線形外場が加わった場合の粒子のダイナミクス、また外場が調和ポテンシャルの場合の1粒子固有状態の三つの事項について説明する。

第4章ではArltらの実験手法[2]について、具体的なパラメーターを用いてレビューを行う。特に研究の主題となる光格子振幅変調による励起波束の生成効率および励起波束の自由時間発展について実験結果の概要を説明する。

第5章では光格子振幅変調による励起波束の生成過程について、数値シミュレーションと光格子振幅変調を摂動論的に取り扱うモデル計算による結果を対比しながら説明する。ここで振幅変調による励起過程は、異なるバンドに属する同じ擬運動量を持つブロッホ状態間のラビ振動によって理解されることを示す。さらに典型的な実験パラメーター領域では、多準位の励起が引き起こされることを示す。またこれらの事実を利用して、振幅変調のタイミングと変調周波数をコントロールすることにより、特定のエネルギー状態への高効率な励起が可能であることを示す。

第6章では振幅変調によって生成された励起波束の自由時間発展を、数値シミュレーションと古典モデルによる解析を基に説明する。特にバンドギャップが現れるバンド境界では二つの過程が同時に起こる。一つはBragg反射と呼ばれるバンド境界から同一バンドの異なるバンド境界への遷移(intraband遷移)であり、もう一つはLandau-Zener遷移と呼ばれる隣接バンド間の遷移(interband遷移)である。古典モデルを用いることによって、励起波束の運動がBragg反射によって誘起される位置および擬運動量空間における振動(Bloch振動)であることが分かる。またLandau-Zener遷移過程について、線形外場における遷移確率の公式を拡張して、調和トラップ系へと適用した。結果として調和トラップ系におけるLandau-Zener遷移確率の公式は線形外場の場合と異なり、励起波束の位置に依存することを言及している。

第7章は本論文の総括である。

[1] H. Ott *et. al.*, Phys. Rev. Lett. 93, 120407(2004); L. Viverit, C. Menotti, T. Calarco, and A. Smerzi, Phys. Rev. Lett. 93, 110401(2004)

[2] J. F. Sherson *et. al.*, New J. Phys. 14, 083013 (2012); P. L. Pedersen *et. al.*, Phys. Rev. A. 88, 023620 (2013)

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 山越 智健

審査委員主査 渡邊 信一

委員 中川 賢一

委員 伏屋 雄紀

委員 森下 亨

委員 斎藤 弘樹

本論文は、光格子と磁気光学トラップの複合ポテンシャルで閉じ込めた冷却ボーズ原子を、光格子振幅変調によってコヒーレント操作する実験結果に触発されて実施された理論的研究の成果をまとめたものである。具体的には、光格子振幅変調によって生成される励起波束の生成過程および、生成された励起波束の自由時間発展に関するAarhus大学の実験結果の詳細を解析するとともに、約6万個の基底を用いた数値シミュレーションにより、一層効率的で精密なコントロールを行うための操作について理論的なメカニズムを解明して新たな提案を行うものである。

本論文は7章と付録から構成されている。

第1章では、研究の背景および論文の構成を述べている。

第2章では、本研究の対象である冷却ボーズ気体・ボーズアインシュタイン凝縮体について述べている。ここではボーズアインシュタイン凝縮体の歴史的背景、光格子と磁気光学トラップを表現する調和トラップ中の理想ボーズ気体、そして原子間相互作用が与える影響について記述している。

第3章では、周期ポテンシャル系についての基礎的な理論を述べている。まず1次元周期系を対象として1粒子状態の静的な固有状態、線形ポテンシャルが加わった場合の冷却原子気体の特徴的なダイナミクスであるBloch振動およびLandau-Zener遷移について述べている。また、現在までに研究されている光格子と調和トラップ中のボーズ原子の固有状態について紹介している。

第4章では、光格子振幅変調による冷却ボーズ原子の空間的固有状態のコヒーレントな生成実験について述べている。ここではAarhus大学の実験を中心に、励起波束をどのように生成しているか、そして生成した励起波束の運動をどのよう

に分析しているかを概観している。バンド構造と位相空間への写像を実験との対応で説明している。

第5章では、光格子振幅変調による励起波束生成過程の詳細について数値シミュレーションをもとに解析を行っている。ここでは光格子および調和トラップ中の固有状態が、一様系のブロッホ状態を用いて展開可能である事実を用いて、“single-Q Rabi”モデルを構築している。このモデルは、光格子振幅変調が異なるバンドの同じ擬運動量状態を結びつけるため、光格子振幅変調が近似的に多準位間のラビ振動によって表現されることを示している。加えて遅延を入れた2段階の $\pi/2$ パルス励起で、特定の状態への高効率励起が可能であることを数値的に証明した。

第6章では、光格子振幅変調によって生成された励起波束の自由時間発展について述べている。既存の単一バンド古典モデルを多バンドへと拡張し、励起波束の古典軌道を求めている。この励起波束の運動が励起バンド中の多バンドにまたがるBloch振動であることを確認した。また励起波束がバンド境界で誘起されるLandau-Zener遷移が起こっていることを量子計算と古典モデルとの対応から確認した。調和トラップと光格子の混成ポテンシャル中のLandau-Zener遷移は、よく知られている線形ポテンシャルの場合と異なり位置に依存することを示している。

第7章は、本研究の結論をまとめている。本論文で考慮されていない、熱および原子間相互作用の影響について言及している。またフェルミ原子系でも同様の実験が行われていることから、本論文の研究が偏極フェルミ原子系に適用可能であることを説明している。

付録では、ラビ振動と光格子ポテンシャル、数値計算手法であるFourier Grid Hamiltonian法と4次Runge-Kutta法、光格子振幅変調による回帰現象について述べている。

上記のような内容についての詳細な吟味をもとに、新規な実験方針の提案を行うなどしていることから、当該分野に関する深い見識が認められる。
本論文は博士（理学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。